

SCHWARZ / EBELING / RICHTER

Kunststoffkunde



Ein Fachbuch von

**konstruktions
praxis**



Vogel Business Media

Schwarz / Ebeling / Richter

Kunststoffkunde

Schwarz / Ebeling / Richter

Kunststoffkunde

Aufbau · Eigenschaften · Verarbeitung ·
Anwendungen der Thermoplaste ·
Duroplaste und Elastomere

Autoren:

Dr.-Ing. Otto Schwarz

Dipl.-Ing. Friedrich-Wolfhard Ebeling

Dipl.-Ing. Harald Huberth

Dipl.-Ing. Frank Richter

Dipl.-Ing. Harald Schirber

Dipl.-Ing. Norbert Schlör

10., überarbeitete Auflage

Vogel Business Media

Dipl.-Ing. (FH) **FRIEDRICH-WOLFHARD EBELING**
 Jahrgang 1936. Nach Chemieingenieurstudium in Nürnberg 6-jährige Industrietätigkeit im Bereich der Aufbereitung und Verarbeitung von Kunststoffen. Von 1965 bis 1999 Lehrtätigkeit für die Gebiete Kunststoffkunde und -Verarbeitung im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum (SKZ). Seit 2000, nach Eintritt in den Ruhestand, Lehrbeauftragter beim SKZ, insbesondere für die Industriemeisterausbildung Kunststoff und Kautschuk. Im Jahr 2010 verstorben.

Dipl.-Ing. (FH) **HARALD HUBERTH**
 Jahrgang 1955. Studium an der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt zum Diplom-Ingenieur (FH) für Kunststofftechnik. Von 1982 bis 1987 Lehrtätigkeit im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum. Von 1987 bis 1994 Leitung der Arbeitsgebiete Seminare bzw. Zweigstellen. Von 1994 bis 2002 Leitung der Aus- und Weiterbildung, danach Geschäftsführer der SKZ-ToP GmbH und ConSem GmbH.

Dipl.-Ing. (FH) **FRANK RICHTER**
 Jahrgang 1970. Studierte Polymerchemie an der Fachhochschule Reutlingen. Nach Abschluss der Studiums arbeitete er als Projekt-Ingenieur am Institut für Angewandte Forschung in Reutlingen, als Entwicklungsingenieur Kunststoffcompounds bei Ensinger GmbH in Nufringen und leitete anschließend den Geschäftsbereich Rohstoffe/Compounds bei Ensinger GmbH, Nufringen. Seit 2011 ist er freier Berater, Trainer und Gutachter für Kunststoff-Werkstoffe.

Dipl.-Ing. (FH) **HARALD SCHIRBER**
 Jahrgang 1938. Nach Werkzeugmacherlehre Studium von 1958 bis 1961 zum Maschinenbauingenieur in Würzburg. 1961 bis 1964 Betriebsingenieur im Automobilbau. 1965 bis 1978 Betriebsassistent und Betriebsleiter im Chemiebaustoffbereich, 1978 bis 1982 Betriebsleiter im Bereich Rohrextrusion. Von 1982 bis 1993 Lehrtätigkeit im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum und zuständig für die Entwicklung von Lehrgängen und Fachtagungen, danach, bis zum Eintritt in den Ruhestand 2003, Abteilungsleiter Technik und Konstruktion.

Dipl.-Ing. (FH) **NORBERT SCHLÖR**
 Jahrgang 1954. Studium von 1973 bis 1977 an der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt zum Diplom-Ingenieur (FH) für Kunststofftechnik; anschließend 4-jährige Tätigkeit in der kunststoffverarbeitenden Industrie. Von 1981 bis 1993 Lehrtätigkeit im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum. Seit 1993 Gruppenleiter Fachtagungen und Seminare.

Dr.-Ing. **OTTO SCHWARZ**
 Jahrgang 1929. Studium 1950 bis 1955 an der TH Aachen, Dipl.-Ing. Verfahrenstechnik. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffverarbeitung an der TH Aachen. 1968 Promotion zum Dr.-Ing., 1968 bis 1973 Tätigkeit beim Kunststoffverband in Frankfurt. Seit 1973 im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum, 1977 stellvertretender Institutsleiter, 1992 bis 1994 Institutsleiter, 1994 Eintritt in den Ruhestand. Anfang 1997 verstorben.

Weitere Informationen:
www.vbm-fachbuch.de

ISBN Print-Ausgabe: 978-3-8343-3366-7 / ISBN E-Book: 978-3-8343-6203-2
 10. Auflage. 2016

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 1987 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg
 Titelgrafik: © molekuul.be - Fotolia.com

Vorwort

Als ich vor über 20 Jahren mein Studium der Kunststoff-Chemie begann, war die «Kunststoffkunde» eines meiner ersten Bücher. Empfohlen von Professoren und Laborassistenten als übersichtliches Standardwerk zum Thema «Kunststoffe». So steht dieses Exemplar der 4. Auflage von 1992 noch heute bei mir im Büro – und die deutlichen Gebrauchsspuren zeigen, dass dieses Buch nach wie vor recht intensiv genutzt wird.

Sie halten nun die 10. Auflage der «Kunststoffkunde» in Ihren Händen (oder betrachten die elektronische Version auf Ihrem Bildschirm).

Nicht nur die Verbreitung von Medien hat sich in den letzten Jahren stark verändert. Der technische Fortschritt verlangt auch besonders von der Kunststoff-Branche neue Entwicklungen und neue Werkstoffe. Wärmeleitfähige und gleichzeitig elektrisch isolierende Kunststoffe für die immer kleiner werdenden elektronischen Geräte und die erhöhte Nachfrage nach biobasierten Werkstoffen im Zuge der Nachhaltigkeitsdiskussion sind zwei Beispiele für diese Herausforderungen.

Materialentwicklungen finden heute hauptsächlich durch Modifikation der Füllstoffe und der Additive statt. Daher wurde das Thema «Zusatzstoffe» aktualisiert und erheblich erweitert. So wird beispielsweise näher auf die verfügbaren Verstärkungsfasern und reibungsmindernde Zusatzstoffe eingegangen. Aufgrund ihrer wachsenden Bedeutung am Kunststoffmarkt sind die Beschreibungen für einige Polymere wie Polyketone, Polyetherimide, Polyamidimide, Polyaryletherketone usw. ergänzt worden. Das Thema der bioabbaubaren und biobasierten Kunststoffe findet entsprechend der umfangreichen gegenwärtigen Entwicklungen deutlich mehr Raum.

Komplett überarbeitet wurde das Thema «Identifizierung von Kunststoffen». Nach wie vor finden Sie dort einfache Analysemethoden – beispielsweise durch Brandproben. Immer häufiger sind heute jedoch auch Analysengeräte in kleineren kunststoffverarbeitenden Unternehmen zu finden, die früher hauptsächlich an Hochschulinstituten oder Forschungsabteilungen von Großunternehmen zu finden waren: Thermoanalyse, Infrarot-Spektrometer und Gas-Chromatografen. Die Beschreibung dieser Messverfahren finden Sie in dem neuen Kapitel «Analytik».

An zahlreichen weiteren Stellen wurden Ergänzungen vorgenommen, um dieses Standardwerk auf dem neuesten Stand zu halten. Vielen Dank an dieser Stelle an den Verlag für die angenehme und gewohnte Zusammenarbeit!

Möge dieses Buch Sie ebenfalls über viele Jahre in Ihrem Berufsleben begleiten – viel Spaß beim Lesen!

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Das Kunststoffgebiet	11
1.1 Entwicklungsgeschichte	11
1.2 Einführung in die Kunststoff-Chemie	12
1.2.1 Stoffe, Materie	12
1.2.2 Chemische Verbindungen, Elemente, Atome, Moleküle	13
1.2.3 Organische Kohlenwasserstoffverbindungen	15
1.2.4 Funktionelle Gruppen	19
1.2.5 Chemische Grundvorgänge	20
1.2.6 Vom Rohöl zum Monomer	22
1.2.7 Polyreaktionen	25
1.3 Aufbau, Struktur und Zustandsbereiche	33
1.3.1 Bindungskräfte	33
1.3.2 Ordnungszustände	37
1.3.3 Eigenschaftsverändernde Faktoren	38
1.3.4 Technologisches Verhalten in Abhängigkeit von der Temperatur	42
1.4 Rezeptierung	45
1.4.1 Zusatz- und Hilfsstoffe für Kunststoffe	46
1.4.2 Zusatz- und Hilfsstoffe für Kautschuke	57
1.5 Lieferformen für Kunststoffherzeugnisse	61
1.5.1 Formmassen	61
1.5.2 Halbzeug und Formteile	62
2 Thermoplaste	65
2.1 Polyethylen (PE)	65
2.1.1 PE-Sondertypen	69
2.2 Polypropylen (PP)	70
2.2.1 Metallocen-PP-Polymere	74
2.3 Polymethylpenten (PMP)	75
2.4 Cycloolefin(-Co)polymere (COP / COC)	76
2.5 Polybutylen (Polybuten, PB)	78
2.6 Polyisobutylen (PIB)	78
2.7 Ionomere	79
2.8 Polyvinylchlorid (PVC)	80
2.8.1 PVC-Modifikationen	87
2.9 Polyvinylidenchlorid (PVDC)	88
2.10 Polyvinylalkohol (PVAL)	89
2.11 Polyvinylacetat (PVAC)	90
2.12 Polystyrol (PS) und Styrol-Copolymerisate	91
2.12.1 Polystyrolschaum	93
2.12.2 Polystyrol schlagfest (SB)	95
2.12.3 Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN)	97
2.12.4 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Terpolymere (ABS)	98
2.12.5 Acrylester-Styrol-Acrylnitril-Terpolymere (ASA)	101
2.13 Polymethylmethacrylat (PMMA), Acrylglas	102

2.14	Polyacrylnitril (PAN)	105
2.15	Polyvinylcarbazol (PVK)	107
2.16	Polyacetal (POM)	109
2.17	Polyketone (PK)	112
2.18	Fluorpolymere	113
2.18.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	114
2.18.2	Perfluorethylenpropylen-Copolymer (FEP)	116
2.18.3	Perfluoralkoxy-Copolymer (PFA/MFA)	116
2.18.4	Polychlortrifluorethylen (PCTFE)	117
2.18.5	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE)	118
2.18.6	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (E-CTFE)	118
2.18.7	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	119
2.18.8	Polyvinylfluorid (PVF)	119
2.18.9	Terpolymer aus Tetrafluorethylen, Hexafluorpropylen und Vinylidenfluorid (THV)	121
2.19	Polyamide (PA)	122
2.20	Polycarbonat (PC)	127
2.21	Polyester	131
2.22	Polyphenylenether (PPE)	135
2.23	Polysulfone	137
2.24	Polyphenylensulfid (PPS)	140
2.25	Polyaryletherketone	142
2.26	Polyetherimide (PEI)	144
2.27	Polyamidimid (PAI)	146
2.28	Celluloseester (CA, CP, CAB)	147
2.29	Polyblends	150
2.30	Thermoplastische Elastomere	151
2.31	Flüssigkristalline Kunststoffe	156
2.32	Biopolymere	158
3	Duroplaste	161
3.1	Phenol-Formaldehyd (PF)	161
3.2	Harnstoff-Formaldehyd (UF)	166
3.3	Melamin-Formaldehyd (MF)	167
3.4	Melamin-Phenol-Formaldehyd (MPF)	168
3.5	Ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze)	169
3.6	Siliconharze (SI)	177
3.7	Polyimide (PI)	178
3.8	Epoxidharze (EP-Harze)	180
3.9	Vernetzte Polyurethane	185
3.9.1	PUR-Schäume	188
3.9.2	Polyurethan-Gießharze	192
3.9.3	PUR-Lacke	194
3.9.4	PUR-Klebstoffe	194
4	Elastomere	195
4.1	Naturkautschuk (NR)	195
4.2	Isoprenkautschuk (IR)	198

4.3	Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)	199
4.4	Butadienkautschuk (BR)	201
4.5	Butylkautschuk (Isobutylene-Isopren-Kautschuk) (IIR)	202
4.6	Chloroprenkautschuk (CR)	203
4.7	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk, Nitrilkautschuk (NBR)	205
4.8	Polyurethan-Elastomere (PUR-Elastomere)	207
4.8.1	PUR-Gießelastomere	207
4.8.2	Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPU)	209
4.8.3	Polyurethankautschuk (AU/EU)	209
4.9	Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPM/EPDM)	211
4.10	Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk (EAM)	213
4.11	Polysulfidkautschuk (Thioplaste) (TM)	214
4.12	Epichlorhydrinkautschuk (CO, ECO, ETER)	216
4.13	Chlorsulfoniertes Polyethylen (CSM)	217
4.14	Fluorkautschuk (FKM)	218
4.15	Silikonkautschuk (Q)	219
5	Analytik	223
5.1	Einfache Methoden zum Identifizieren von Kunststoffen	223
5.1.1	Voruntersuchungen	223
5.1.2	Dichte	224
5.1.3	Löslichkeit	225
5.1.4	Thermisches Verhalten	226
5.1.5	Brandprobe	227
5.2	Differential Scanning Calorimetrie (DSC)	230
5.3	Thermogravimetrie (TGA)	231
5.4	Infrarot-Spektroskopie (IR)	232
5.5	Gas-Chromatografie (GC)	233
5.6	REM / EDX	234
6	Grundlagen der Kunststoffprüfung	237
6.1	Verarbeitungseigenschaften von Formmassen	238
6.1.1	Schmelzindexprüfung (DIN EN ISO 1133)	238
6.1.2	Viskositätszahl/K-Wert (DIN EN ISO 1628)	241
6.1.3	Bestimmung der Rohdichte (DIN EN ISO 1183)	243
6.1.4	Schüttdichte, Stopfdichte und Füllfaktor (DIN EN ISO 60, DIN EN ISO 61, DIN ISO 171)	244
6.1.5	Rieselfähigkeit (DIN EN ISO 6186)	246
6.1.6	Korngröße und Kornverteilung (DIN 53477)	246
6.1.7	Restfeuchtigkeit	246
6.2	Mechanische Eigenschaften	247
6.2.1	Zugversuch (DIN EN ISO 527)	247
6.2.2	Biegeversuch (DIN EN ISO 178)	249
6.2.3	Bestimmung des Elastizitätsmoduls	252
6.2.4	Schlagbiegeversuch (DIN EN ISO 179)	252
6.2.5	Härteprüfungen	254
6.2.6	Reibung und Verschleiß	255
6.3	Thermische Eigenschaften	255

6.3.1	Wärmeleitfähigkeit (DIN EN ISO 22 007)	255
6.3.2	Wärmeausdehnung (ISO 11 359)	256
6.3.3	Spezifische Wärmekapazität	257
6.3.4	Formbeständigkeit in der Wärme	257
6.3.5	DMTA (Dynamisch-Mechanische Thermo-Analyse)	258
6.4	Elektrische Eigenschaften	259
6.4.1	Elektrische Widerstandswerte (DIN IEC 60 093 VDE 0303/30)	259
6.4.2	Dielektrische Eigenschaften (DIN IEC 60 250)	263
6.4.3	Kriechstromfestigkeit (DIN EN 60 112)	263
6.4.4	Lichtbogenfestigkeit (DIN VDE 0303)	264
6.4.5	Durchschlagfestigkeit (DIN EN 60 243-1)	264
6.4.6	Elektrostatische Aufladung (DIN VDE 0303, DIN 53 486)	264
6.4.7	Verhalten bei Glimmentladungen (DIN EN 60 343)	265
6.5	Beständigkeiten	265
6.5.1	Lösemittelbeständigkeit	265
6.5.2	Spannungsrisssbildung	266
6.5.3	Chemische Beständigkeit	269
6.5.4	Witterungsbeständigkeit	270
6.5.5	Strahlenbeständigkeit	271
6.5.6	Brandverhalten	271
6.6	Prüfung von Kautschuk und Gummi	272
6.6.1	Prüfungen am Rohkautschuk und an unvulkanisierten Mischungen	273
6.6.2	Prüfungen am Vulkanisat	275
6.7	Langzeitverhalten der Kunststoffe	279
6.7.1	Viskoelastizität	279
6.7.2	Statisches Langzeitverhalten (DIN EN ISO 899-1/-2)	281
6.7.3	Dynamisches Langzeitverhalten (DIN 53 442)	286
6.8	Weitere Prüfungen	288
6.8.1	Prüfung an Fertigteilen	289
6.8.2	Qualitätssicherung und -Überwachung	290
6.8.3	Product Compliance	291
	Kurzzeichen für Polymere in Anlehnung an DIN EN ISO 1043-1	293
	Quellenverzeichnis	295
	Stichwortverzeichnis	297

1 Das Kunststoffgebiet

1.1 Entwicklungsgeschichte

Die Entwicklungsgeschichte der Kunststoffe beginnt gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Eine stark fortschreitende Industrialisierung forderte neue Werkstoffe mit Eigenschaften, die mit den bis dahin bekannten Werkstoffen wie Metallen, Glas, Keramik und Naturstoffen nur schwer umsetzbar waren. Es begann die Suche nach Materialien mit besonderen Eigenschaften, die in großer Menge günstig verfügbar und dazu noch zu leicht zu verarbeiten waren. Experimentierfreudige Forscher und neugierige Chemiker taten das, was Alchimisten in den Jahrhunderten zuvor bereits auf der Suche nach der Herstellung von Gold getan haben: Sie mischten und kochten fleißig verschiedenste Substanzen miteinander. Im ersten Schritt wurde mit Naturstoffen wie Cellulose und Kautschuk experimentiert. Das Ergebnis waren Produkte wie Cellulosenitrat und dauerhaft elastischer Gummi. Eine Kategorie neuer Werkstoffe war auf dem Markt. Damit waren auf einmal völlig neue Produkte herstellbar – beispielsweise transparente flexible Filme oder vollkommen wasserdichte Zelte und Bekleidung. Im zweiten Schritt wurden anstelle der Naturstoffe als Rohstoffbasis preisgünstige und in großen Mengen zur Verfügung stehende Erdölbestandteile für die weiteren Entwicklungen verwendet.

Das erste auf diesem Weg hergestellte Produkt wurde 1907 von LEO BAEKELAND in den USA patentiert. In Anlehnung an den Namen des Erfinders wurde das Material «Bakelit» genannt. Im Gegensatz zu den bis dato bekannten abgewandelten Naturstoffen bestand dieser Werkstoff rein aus Erdölbestandteilen, er war also ein «Kunststoff». Mit diesem Werkstoff konnten einfache Bauteile wie Gehäuse und Griffe hergestellt werden. Der Rohstoff ließ sich in Formen pressen und war nach dem Aushärtungsprozess meist ohne zeitintensive Nachbearbeitung direkt verwendbar. Die einfache Möglichkeit der Formgebung verlieh diesen Werkstoffen einen weiteren Namen: «Plastik».

Heute kennen wir eine enorme Vielzahl an weiteren Kunststoffen. Aus den ersten Experimenten mit den Naturstoffen hat sich ein völlig neuer Bereich in der Chemie – die makromolekulare Chemie – entwickelt. Wir setzen heute Kunststoffe in allen Lebensbereichen ein – oft ohne dass sie überhaupt noch bewusst wahrgenommen werden. Leider wird in der heutigen Zeit eher über die negativen Auswirkungen des Einsatzes von Kunststoff diskutiert, beispielsweise über die Ansammlung von Kunststoffabfällen in unseren Meeren – die Kehrseite der günstigen und dauerhaften Werkstoffe. Wer heute in einer Suchmaschine bei der Bildersuche «Plastik» eingibt, findet hauptsächlich Bilder von Müllansammlungen. Dabei werden die positiven Seiten, die unser heutiges Leben begleiten, gerne übersehen. Kein elektronisches Gerät funktioniert ohne Isolierung der Kabel, Autos ohne Lackierung und Bereifung sind selten anzutreffen, und Infusionsschläuche in der Medizintechnik aus Glas oder Holz machen ebenso wenig Sinn. Wichtig ist daher eine differenzierte Betrachtung und ein nachhaltiger Umgang mit dem Werkstoff «Kunststoff». Einen begrenzt zur Verfügung stehenden Rohstoff einfach wegzuerwerfen ist definitiv nicht nachhaltig. Die Vermeidung unnötiger Abfälle und die sinnvolle Wiederverwertung gebrauchter Produkte muss daher ein vorrangiges Ziel unserer Gesellschaft sein. Der Trend des verstärkten Einsatzes von biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen geht bereits eindeutig in diese Richtung.

Kunststoffe sind chemisch gesehen «Polymere». Sie bestehen aus vielen (griech.: *poly* = viele) kleinen einzelnen Molekülen (griech.: *meros* = Teilchen), die zu einem sehr großen Molekül

verkettet wurden. Das Polymer mit der größten Produktionsmenge weltweit ist das Naturprodukt Cellulose. Nahezu alle Pflanzen produzieren dieses Polymer als Stützstruktur. Auch die Erbsubstanz, die DNA, ist ein Polymer. Sie setzt sich aus der Verkettung von vier organischen Molekülen zusammen (Adenin, Guanin, Cytosin und Thymin). Durch die Reihenfolge der Verkettung wird die komplette Erbinformation aller Lebewesen in biologischer Form gespeichert.

Die Grenzen zwischen natürlichen und synthetischen Polymeren (den «Kunststoffen») verwischen, wenn natürliche Ausgangsbausteine, wie Milchsäure, zur Herstellung eingesetzt werden. Durch Verkettung entsteht die Polymilchsäure (Polylactid), ein thermoplastisch verarbeitbarer Kunststoff. Die Produkte daraus unterscheiden sich optisch nicht von Produkten aus synthetisch hergestelltem Kunststoff.

Allerdings sind Moleküle nur unter bestimmten Voraussetzungen (die in diesem Abschnitt näher behandelt werden) zu Polymeren verknüpfbar. Da die kommerziell interessanten Ausgangsprodukte in den letzten Jahrzehnten bereits ausführlich untersucht wurden, kamen in den letzten Jahren praktisch keine grundlegend neuen Kunststoffe mehr auf den Markt. Die Entwicklung geht vielmehr in Richtung der Kombination der einzelnen Moleküle zu modifizierten Polymeren. Neben der chemischen Struktur eines Polymers tragen auch die Zusatzstoffe maßgeblich zu den Eigenschaften eines Werkstoffes bei. Neue Füllstoffe wie Carbon-Nanotubes, Graphene und wärmeleitfähige Mineralien stellen nur eine kleine Auswahl dar. Der Werkstoff «Kunststoff» darf daher nicht allein als Polymer gesehen werden. Dies ist insbesondere auch dann wichtig, wenn es um die Einhaltung von gesetzlichen Vorschriften wie REACH und RoHS oder Lebensmittelkontaktmaterialien geht. Eine genaue Beurteilung der Werkstoffe setzt die Kenntnis aller möglichen Inhaltsstoffe voraus.

Für die Kombination von Kunststoffen mit Füllstoffen und Additiven sind keine großchemischen und teuren Polymerisationsanlagen erforderlich. Kommerzielle Rührwerke, Knetzer oder Compoundierextruder liefern individuell angepasste Werkstoffe von einem bis zu hunderttausenden Kilogramm. Damit können auch kleinere und mittelständische Unternehmen eigene Werkstoffe in kurzer Zeit kostengünstig modifizieren oder komplett neu entwickeln. Auf diesem Weg steht somit eine nahezu unendliche Materialvielfalt zur Verfügung.

Die Entwicklung bleibt also spannend.

1.2 Einführung in die Kunststoff-Chemie

1.2.1 Stoffe, Materie

Der Name Kunststoffe sagt aus, dass es sich hierbei um Stoffe handelt, die künstlich (synthetisch) hergestellt werden.

Was sind Stoffe?

Stoffe sind Substanzen (Materie), die fest, flüssig oder gasförmig vorkommen können. Man unterscheidet natürliche Stoffe, wie z. B. Holz, Erze, Steine, Sand, und synthetische Stoffe, wie Kunststoffe, Glas, bestimmte Textilien, Farbmittel u.a.m.

Stoffe sind selten in reiner Form vorhanden. Vielfach stellen sie Gemische dar. Gemische können homogen (einheitlich) oder heterogen (uneinheitlich) sein.

Beispiele

Homogene Gemische: Luft, Messing, Salzlösung.

Heterogene Gemische: Beton, sandhaltige Erde, Schlamm.

Gemische lassen sich in reine Stoffe zerlegen: Wasser verdampft aus einer Salzlösung, zurück bleibt reines Salz.

Weitere *Beispiele* von Trennverfahren für Gemische sind

Destillieren: Erdölzerlegung (flüssig-flüssig).

Filtrieren: Feststoffe von Erdöl trennen (fest-flüssig).

Sieben: Steine selektieren (fest-fest).

Magnetscheiden: Eisenerz von Gestein trennen (fest-fest).

Weil die Trennung der Gemische auf physikalischem Wege erfolgt, nennt man sie physikalische Trennverfahren.

1.2.2 Chemische Verbindungen, Elemente, Atome, Moleküle

Werden Gemische so weit zerlegt, dass eine weitere physikalische Trennung nicht mehr möglich ist, erhält man chemische Verbindungen oder Elemente.

Beispiele von chemischen Verbindungen: Kochsalz, Sand, Kalkstein, Cellulose, Zucker, Alkohol.

MERKSATZ

Bei chemischen Verbindungen liegen feste Bindungen von einzelnen Elementen miteinander vor, die durch physikalische Trennverfahren nicht getrennt werden können.



Elemente

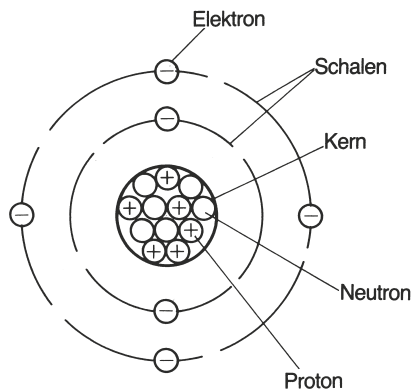
Chemische Verbindungen sind aus Elementen aufgebaut. Elemente existieren aber auch in reiner Form.

Beispiele: Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Aluminium (Al), Silizium (Si), Schwefel (S), Chlor (Cl), Eisen (Fe), Fluor (F).

Die in Klammern gesetzten Buchstaben sind die international festgelegten Symbole der Elemente.

Bild 1.1

Kohlenstoffatom



Atome

Atome sind die kleinsten Bausteine der Elemente. Sie werden aus drei verschiedenen Elementarteilchen – den Protonen, Neutronen und Elektronen – aufgebaut.

Im Kern befinden sich die Protonen und Neutronen. Die Neutronen als nicht geladene Teilchen schirmen die positiv geladenen Protonen ab, damit sie sich nicht gegenseitig abstoßen. Die negativ geladenen Elektronen, die in gleicher Anzahl wie die Protonen vorhanden sind, umkreisen mit hoher Geschwindigkeit auf verschiedenen Bahnen den Kern. Dabei heben sich die elektrostatische Anziehungskraft und die Zentrifugalkraft gegenseitig auf.

Moleküle

Chemische Verbindungen sind aus zwei oder mehreren Atomen aufgebaut, die fest aneinander gebunden sind.



MERKSATZ

Die kleinste Einheit der chemischen Verbindung ist das Molekül.

Beispiel Wasser: Wasserstoff-Sauerstoff-Verbindung.

2 Atome Wasserstoff binden sich mit einem Atom Sauerstoff zu einem Molekül

Wasser.

Beispiel Methan: Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindung.

1 Kohlenstoffatom bindet 4 Wasserstoffatome zu einem Molekül Methan.

Der Zusammenhalt der Elemente erfolgt über Bindungskräfte. Das gegenseitige Bindungsvermögen der Elemente nennt man Wertigkeit oder Valenz. Jedem Atom eines Elements kommen eine bestimmte Anzahl von Valenzen zu, mit denen sie sich mit anderen Atomen binden. Dabei gilt, dass in einer chemischen Verbindung alle Valenzen abgesättigt sein müssen.

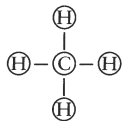
Struktur- und Summenformel

Die Valenzen werden beim Aufschreiben von Formeln vereinfacht als Striche (Bindearme) dargestellt (Strukturformel).

Beispiel: Wasser



Beispiel: Methan



Die Anzahl der Bindearme je Atom eines Elements ist gleichzusetzen mit der Wertigkeit des Elements.

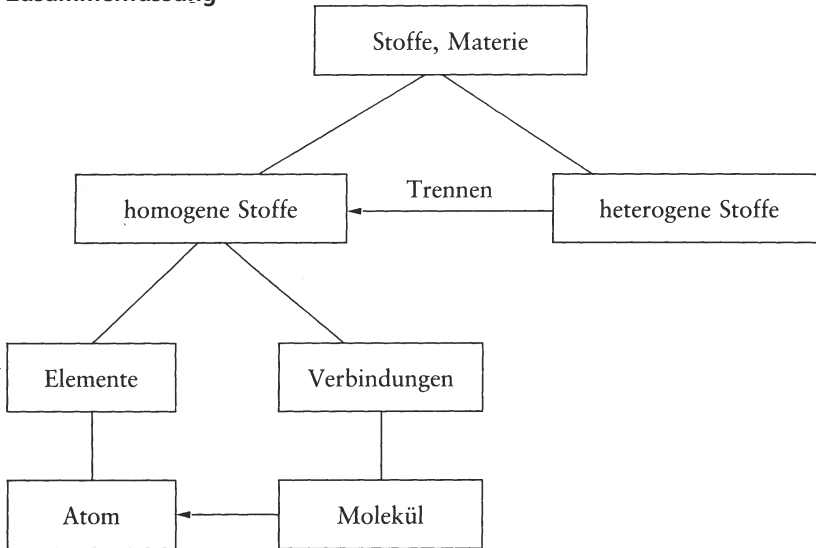
Beispiele

Kohlenstoff	= 4-wertig
Sauerstoff	= 2-wertig
Wasserstoff	= 1-wertig

Eine vereinfachte Schreibweise ist die Summenformel.

Beispiel Wasser: H_2O

Beispiel Methan: CH_4

Zusammenfassung

Stoffe können Gemische von chemischen Verbindungen oder Elementen sein.

Elemente sind die Grundstoffe, die die Stoffe aufbauen.

Die kleinste Einheit der Elemente ist das Atom. Gehen mehrere Atome eines Elements oder mehrerer Elemente eine feste Bindung ein, spricht man von chemischen Verbindungen. Moleküle werden durch Bindekräfte (Valenzen) zusammengehalten. Die kleinste Einheit der chemischen Verbindungen ist das Molekül.

1.2.3 Organische Kohlenwasserstoffverbindungen

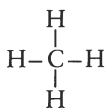
Kunststoffe sind organische chemische Verbindungen. Organische Stoffe sind Verbindungen, die hauptsächlich aus den Elementen Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) aufgebaut sind.

Daneben finden sich in vielen organischen Verbindungen auch die Elemente Sauerstoff (O) und Stickstoff (N). Seltener sind die Elemente Schwefel (S), Chlor (Cl), Fluor (F) und Silizium (Si) enthalten.

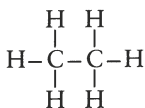
Gesättigte Kohlenwasserstoffe

Die einfachste organische Verbindung ist das Methan (CH_4). Kohlenstoffatome sind auch in der Lage, sich durch Bindungen aneinanderzureihen und lange Ketten zu bilden. Dadurch ist eine Vielzahl von verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen bekannt.

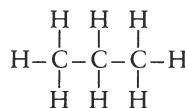
Beispiele für Kohlenwasserstoffe



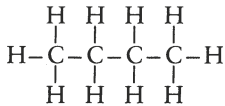
Methan (CH_4)



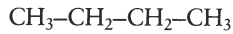
Ethan (C_2H_6)



Propan (C_3H_8)



oder die verkürzte Schreibweise für Butan



Butan (C_4H_{10})

Diese aufgeführten Kohlenwasserstoffe vergrößern sich von Molekül zu Molekül um ein Kohlenstoff- und zwei Wasserstoffatome.



MERKSATZ

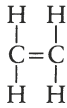
Allgemein gibt man diesen Kohlenwasserstoffen die Formel $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ und den allgemeinen Namen Alkane oder Paraffine.

Es handelt sich um gesättigte Kohlenwasserstoffe, weil zwischen den Kohlenstoffatomen immer nur ein Bindearm (Valenz) steht.

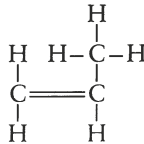
Ungesättigte Kohlenwasserstoffe

Es gibt auch Kohlenwasserstoffe, bei denen sich zwei Kohlenstoffatome mit zwei oder drei Bindearmen aneinanderketten. Man spricht von Doppel- oder Dreifachbindungen.

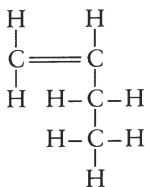
Beispiele



Ethylen (C_2H_4)

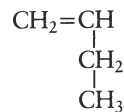


Propylen (C_3H_6)



Butylen (C_4H_8)

oder die verkürzte Schreibweise für Butylen



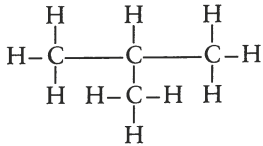
DEFINITION

Kohlenwasserstoffe mit einer Doppelbindung werden als Alkene oder Olefine bezeichnet. Sie haben die allgemeine Formel C_nH_{2n} .

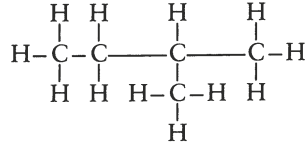
Isoverbindungen

Warum man bei den Kohlenwasserstoffen meistens Strukturformeln schreibt, hat seinen Grund. Neben dem geraden kettenförmigen Aufbau der Kohlenwasserstoffe hat die Natur auch verzweigte entstehen lassen. Von Butan aufwärts können die Ketten verzweigen.

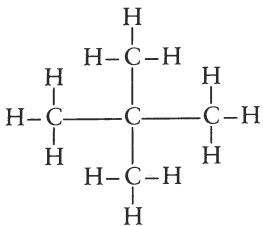
Beispiele



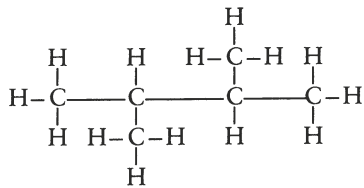
Isobutan (C_4H_{10})



Isopentan (C_5H_{12})



Isopentan (C_5H_{12})



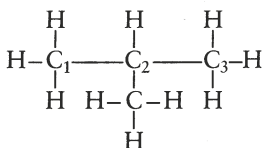
Isohexan (C_6H_{14})

Im Gegensatz zu den kettenförmigen werden die verzweigten Kohlenwasserstoffe als Isoverbindungen bezeichnet. Sie unterscheiden sich in den Eigenschaften bei gleicher chemischer Zusammensetzung nur geringfügig von den normalen kettenförmigen Kohlenwasserstoffen.

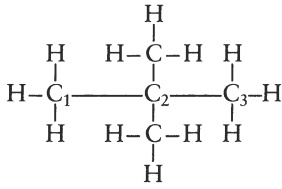
Zur exakten Unterscheidung von Verbindungen mit gleicher Anzahl an Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen werden die Kohlenstoffe der längsten Kette nummeriert und die Seitengruppen mit Angabe, an welchen Kohlenstoffen sie angebaut sind, extra genannt. (Die Nummerierung erfolgt nur gedanklich und wird normalerweise nicht an die Kohlenstoffatome geschrieben.) Der Kohlenwasserstoff mit der längsten Kette gilt nun als Grundbaustein, an dem die Seitengruppen anhängen.

Die Bezeichnungen der Seitengruppen leiten sich von den Kohlenwasserstoffnamen ab, wobei man die Endung -an durch -yl ersetzt.

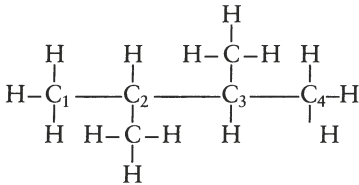
Beispiele



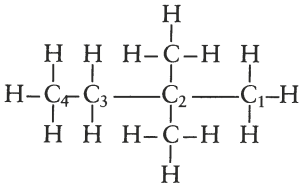
Isobutan
2-Methylpropan



Isopentan
2,2-Dimethylpropan



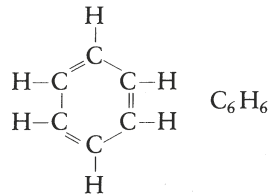
Isohexan
2,3-Dimethylbutan



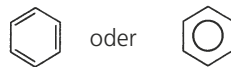
Isohexan
2,2-Dimethylbutan

Aromaten

Neben den kettenförmigen und verzweigten Kohlenwasserstoffen gibt es auch ringförmige, die als «Aromaten» bezeichnet werden. Die wichtigste ringförmige Kohlenwasserstoffverbindung ist das Benzol.

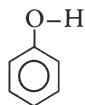


Das Benzol wird in Formelbeispielen häufig durch die Kurzform dargestellt.

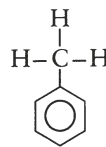


Der mit drei Doppelbindungen versehene Ring ist sehr stabil. Wasserstoffe können aber durch andere Atome oder Atomgruppen ersetzt werden.

Beispiele



Phenol ($\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{OH}$)



Toluol ($\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{CH}_3$)

1.2.4 Funktionelle Gruppen

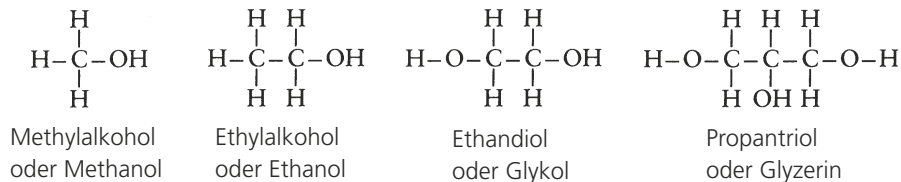
Es ist möglich, ein oder mehrere Wasserstoffe an den Kohlenwasserstoffverbindungen mittels chemischer Reaktionen durch andere Atome oder Atomgruppen zu ersetzen. Es lassen sich reaktionsfähige Atomgruppen anbauen. Solche Atomgruppen können nicht allein existieren, da sie einen freien Bindearm (Valenz) zum Anbau an den Kohlenwasserstoff besitzen. Sie sind nur theoretisch vorstellbar.

Beispiele

Atomgruppe	Name der Gruppe
-OH	Hydroxyl- bzw. Alkoholgruppe
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C} \\ \diagdown \\ \text{O}-\text{H} \end{array}$	Carboxyl- oder Säure-(Acid-)gruppe
$\begin{array}{c} \text{H} \\ \diagup \\ -\text{N} \\ \diagdown \\ \text{H} \end{array}$	Amin- oder Aminogruppe
-N=C=O	Isocyanatgruppe

Alkohole

Beim Austausch von Wasserstoffen durch alkoholische Gruppen (-OH) an Kohlenwasserstoffen erhält man Alkohole.



Bezeichnung der Alkohole

Sind zwei oder mehrere gleiche Atomgruppen an ein Molekül angebaut, werden vor den Gruppennamen die Vorsilben

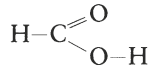
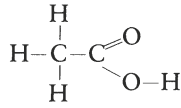
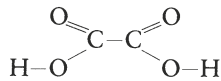
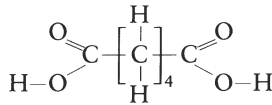
di = zwei
tri = drei
tetra = vier
oder poly = viele gesetzt.

Beispiel

Ethan → Ethandiol
Propan → Propantriol
Polyol

Organische Säuren

Der Austausch von Wasserstoffatomen bei Kohlenwasserstoffen durch Säuregruppen (-COOH) lässt organische Säuren entstehen.

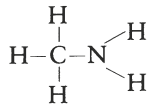
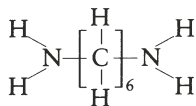
Ameisensäure
oder MethansäureEssigsäure
oder EthansäureOxalsäure
oder EthandisäureAdipinsäure
oder Hexandisäure

Für die Namensgebung der Säuren ist zu beachten, dass der Kohlenstoff der Säuregruppe mit-zuzählen ist.

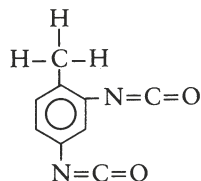
Amine und Isocyanate

Für die Amino- und Isocyanatverbindungen gilt das Gleiche, wie es bei den Alkoholen und Säuren beschrieben wurde.

Beispiel: Amine

Methylamin
oder MethanaminHexamethyldiamin
oder Hexandiamin

Beispiel: Isocyanat



Toluol-di-isocyanat

1.2.5 Chemische Grundvorgänge

Alle chemischen Vorgänge bezeichnet man als chemische Reaktionen. Als Anstoß für solche Reaktionen wird das Verbindungsstreben der Stoffe, insbesondere bei Zufuhr von Wärme, Elektrizität und Licht angesehen.

Es ist zu beachten, dass nicht der Wasserstoff der OH-Gruppe, sondern ein Wasserstoff des Phenolrings abwandert.

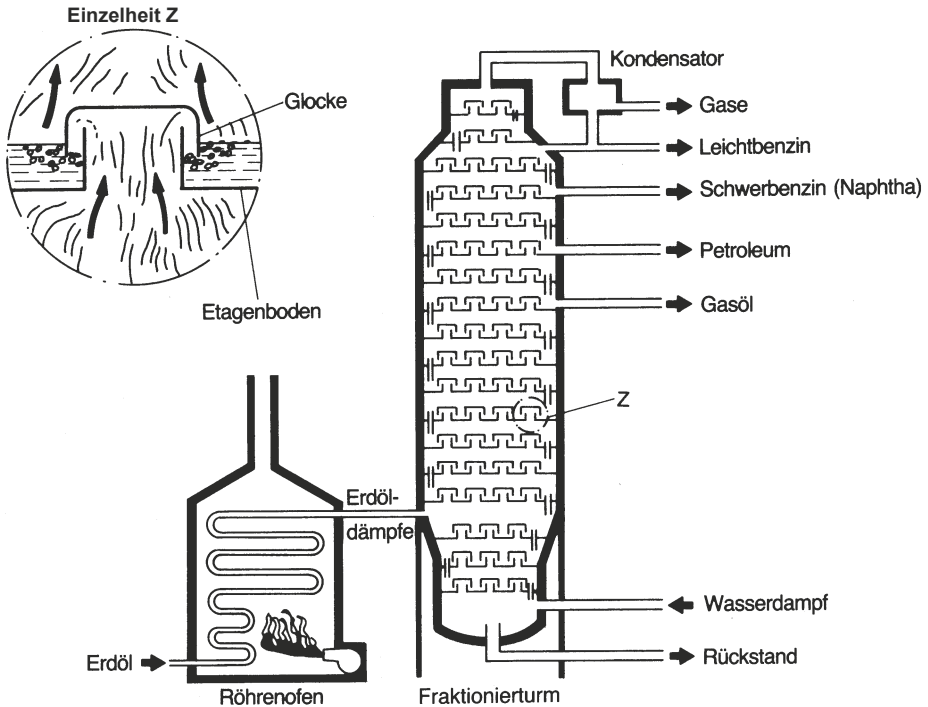


Bild 1.2 Destillation von Erdöl

1.2.6 Vom Rohöl zum Monomer

Fast alle organischen Stoffe, die synthetisch aufgebaut werden, haben als Rohstoffbasis Erdöl, Erdgas oder Kohle. Davon hat das Erdöl die größte Bedeutung. Erdöl (Rohöl) enthält mehr als 1000 verschiedene Kohlenwasserstoffverbindungen. Zur Weiterverarbeitung zu synthetischen Produkten muss Erdöl erst aufbereitet werden.

Fraktionierte Destillation

Erdöl wird im Röhrenofen auf etwa 400 °C erhitzt und einem gekühlten Fraktionierturm zugeleitet. Der größte Teil des Erdöls verdampft und wandert durch die vielen Etagen des Fraktionierturms. Beim Abkühlen des Erdöldampfs kondensieren in den einzelnen Etagen bestimmte Erdölanteile und werden seitlich abgeführt. Damit der Erdöldampf langsam aufsteigt, sind die Etagendurchlässe mit Glocken abgedeckt (Bild 1.2).

Zusammensetzung der Fraktionen

Die bei der Destillation erhaltenen Fraktionen sind Kohlenwasserstoffe, die sich in ihrem Siedepunkt und damit ihren Molekülgrößen unterscheiden.

Fraktion	Siedepunkt °C	Kohlenwasserstoffe
Gase	bis 30 °C	von C ₁ bis C ₄
Leichtbenzin	bis 100 °C	von C ₅ bis C ₇
Schwerbenzin	bis 200 °C	von C ₇ bis C ₁₀
Petroleum	bis 260 °C	von C ₁₁ bis C ₁₄
Gasöl	bis 360 °C	von C ₁₆ bis C ₁₉

Anteile der Fraktionen

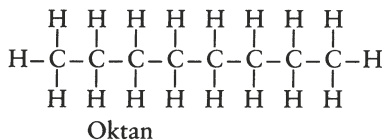
Die prozentualen Anteile sind je nach Herkunftsland verschieden. Im Allgemeinen wächst mit steigendem Siedepunkt der prozentuale Anteil der Fraktionen.

Beispiel

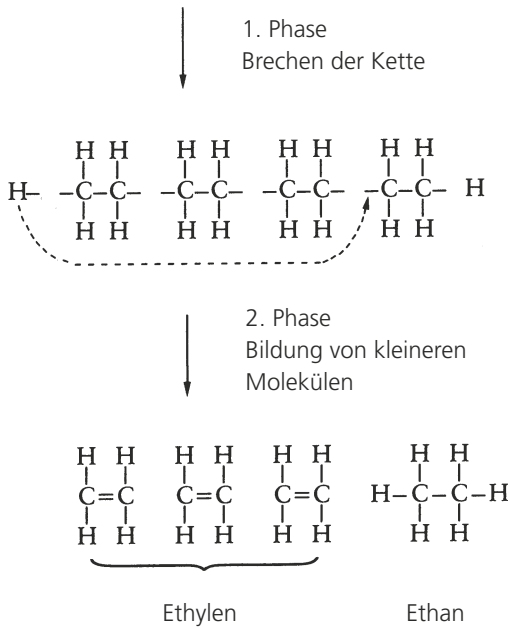
Fraktion	Anteil
Gase	3%
Leichtbenzin	8%
Schwerbenzin	10%
Petroleum	15%
Gasöl	20%
<i>Rückstand</i>	
Schweröl	20%
Bitumen	24%

Weiterverarbeitung der Fraktionen

Für die Chemie sind die Benzinfraktionen (Naphtha) als Basisrohstoff wichtig. Im sogenannten Crackprozess werden die Kohlenwasserstoffe des Benzins durch hohe Temperaturen (850 °C) und Katalysatoren in kleinere gasförmige ungesättigte Kohlenwasserstoffe umgebaut. Katalysatoren sind in der Chemie Hilfsmittel, die eine Reaktion schneller ablaufen lassen. Beim Cracken werden die Kohlenwasserstoffverbindungen auseinandergerissen und umgebaut. Dieser Prozess ist keine exakte chemische Reaktion, so dass hierfür kein Reaktionsablauf formelmäßig aufgeschrieben werden kann. Die Zerfallsreaktion an einem Molekül aus dem Benzingemisch soll veranschaulichen, wie z. B. die Crackung ablaufen kann:



↓
1. Phase
Brechen der Kette

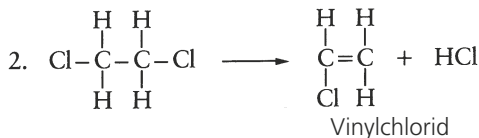
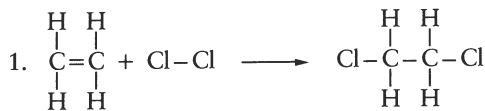


Aus einem Oktanmolekül entstehen drei Ethylenmoleküle und ein Ethanmolekül. In der Praxis wird aber ein vielfältigeres Gemisch verschiedener Gase erhalten. Man kann die Ausbeute zugunsten einer bestimmten Verbindung durch geeignete Crackbedingungen erhöhen. Das Gasgemisch wird zur Abtrennung von reinem Ethylen verflüssigt und anschließend fraktioniert destilliert. Ethylen ist ein sehr wichtiger Basisrohstoff für viele organische Produkte. Aus Ethylen kann man direkt durch eine Reaktion einen Kunststoff, aber auch weitere Zwischenprodukte herstellen.

Beispiele von Umwandlungsreaktionen

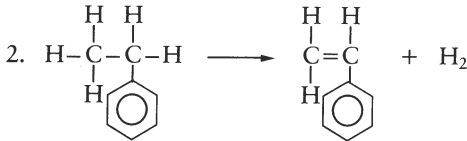
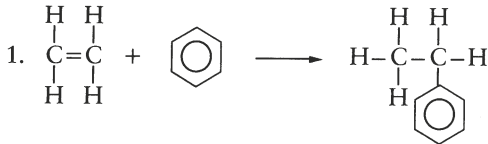
Vinylchlorid

Über zwei chemische Reaktionsschritte kann man aus Ethylen und Chlor Vinylchlorid herstellen.



Styrol

Aus Ethylen und Benzol entsteht über zwei Reaktionsschritte Ethylenbenzol (Styrol).



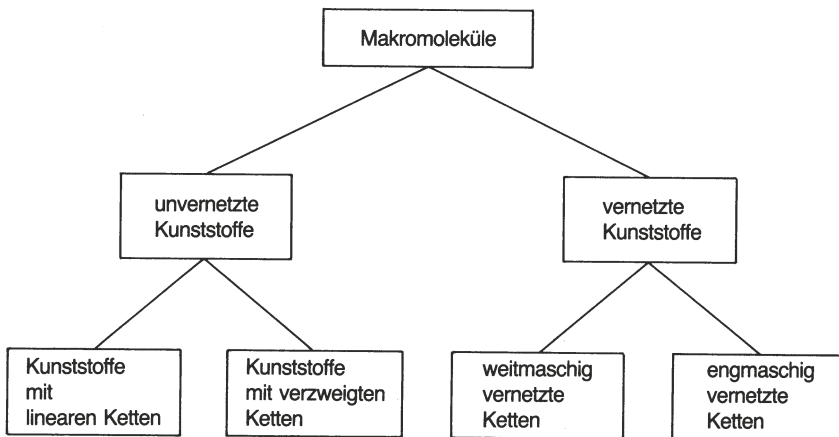
DEFINITION

Moleküle, die zur Kunststoffherstellung eingesetzt werden, bezeichnet man als Monomere. Die genannten Moleküle Ethylen, Vinylchlorid und Styrol sind Monomere, aus denen Kunststoffe aufgebaut werden können.



1.2.7 Polyreaktionen

Aus vielen kleinen Bausteinen (Monomeren) werden über Polyreaktionen Großmoleküle oder Polymere (Makromoleküle) aufgebaut.



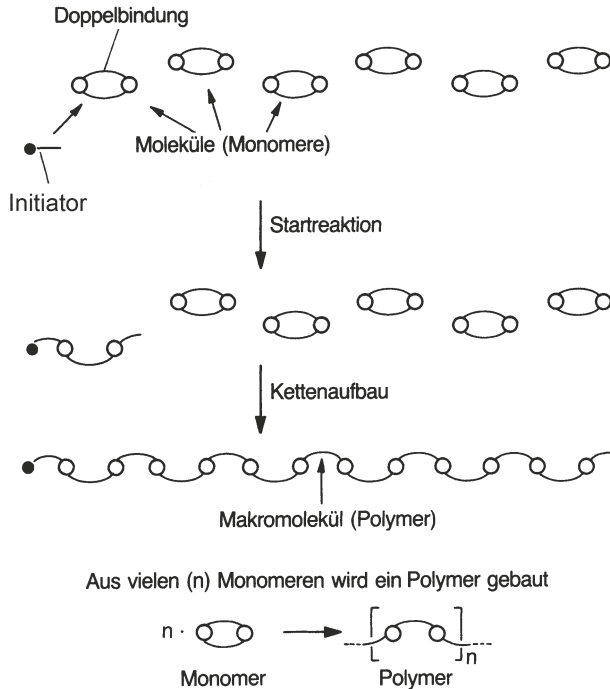
Polymerisation

Bei der Polymerisation werden viele kleine Moleküle gleicher oder ähnlicher Bauart (Monomere) zu einem Makromolekül zusammengebaut. Die Moleküle müssen für die Reaktion Doppelbindungen besitzen. Wärme und Katalysatoren spalten die Doppelbindung, so dass sich an jedes Molekül über freie Bindearme weitere Moleküle anbinden lassen.

Die Polymerisation läuft in drei Stufen ab:

- Startreaktion,
- Wachstumsreaktion,
- Abbruchreaktion.

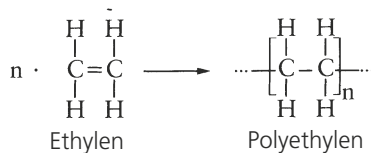
Der Start wird durch den Initiator ausgelöst. Dann erfolgt das Wachstum zu einem Makromolekül. Am Ende der Kette wird die Absättigung der freien Valenz z. B. durch Ausbildung einer Doppelbindung erreicht. Nachfolgend ein Modellbeispiel für die Polymerisation:



Das «n» hinter der eckigen Klammer gibt die Anzahl der Monomere an, die in die Molekülkette eingebaut worden sind, und wird als Polymerisationsgrad bezeichnet. Bei makromolekularen Stoffen ist der Polymerisationsgrad immer größer als 1000.

Polyethylen, Polyvinylchlorid, Polystyrol

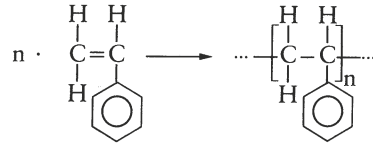
Ersetzt man im Beispiel die Kugeln durch Atomgruppen, erhält man die Polymerisationsreaktionen für Polyethylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS).





Vinylchlorid

Polyvinylchlorid



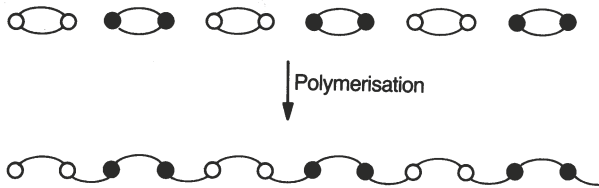
Styrol

Polystyrol

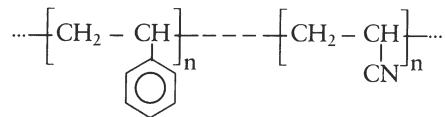
Copolymerie

Neben den drei wichtigsten Kunststoffen PE, PVC, PS gibt es noch weitere Polymerisate (Kapitel 2). Außerdem lassen sich auch zwei oder drei verschiedenartige Monomere in eine Kette polymerisieren. Diese Produkte heißen Copolymerie oder Terpolymerie.

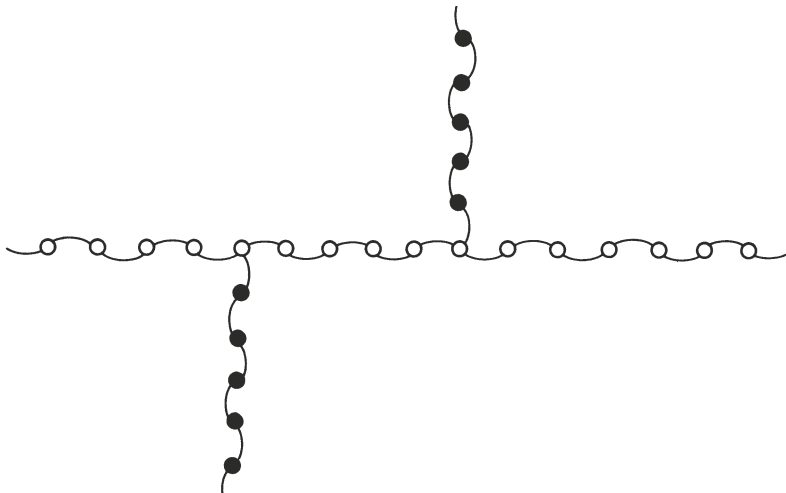
Beispiel



Ein Copolymerisat ist z. B. Styrol-Acrylnitril



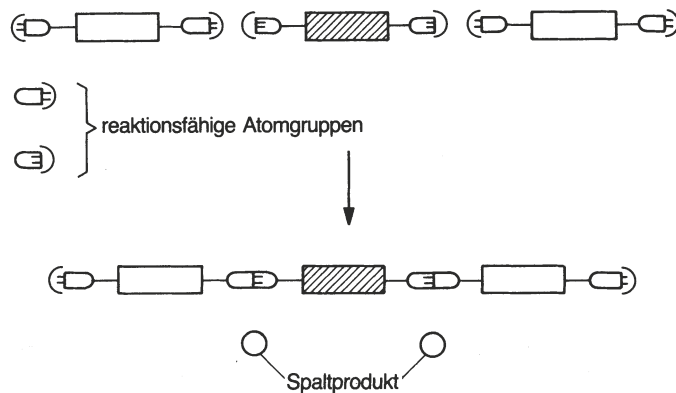
Auch das Aufpfropfen von fertigen Polymerketten auf eine andere Polymerkette ist möglich (Pfropfcopolymerisate).



Polykondensation

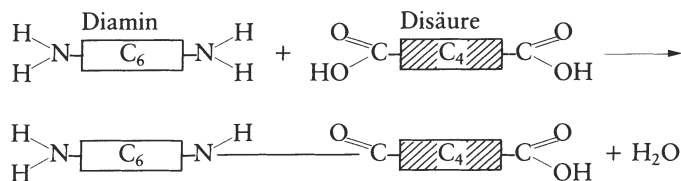
Bei der Polykondensation werden in der Regel zwei verschiedene Arten von Molekülbausteinen zusammengebaut. Diese Moleküle besitzen an ihren Enden je eine reaktionsfähige Atomgruppe. Es ist aber auch möglich, gleiche Molekülbausteine mit zwei verschiedenartigen Atomgruppen zu Makromolekülen zusammenzubauen. Bei der Reaktion wird immer ein Spaltprodukt (meist Wasser) ausgeschieden.

Modellbeispiel

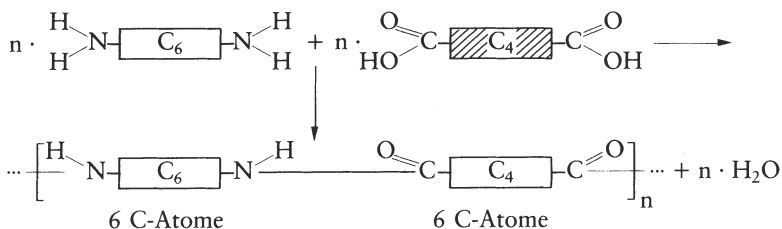


Polyamid

Überträgt man das Modellbeispiel auf die chemischen Verbindungen Diamin und Disäure, erhält man Polyamide (PA).



Die Polykondensation verläuft aufgrund der bifunktionell (zwei reaktionsfähige Atomgruppen) ausgerüsteten Moleküle an den beiden Endseiten weiter, bis ein Polyamidmolekül entstanden ist.



Es gibt verschiedene Polyamide, je nachdem, wie viele Kohlenstoffatome in den Bausteinen enthalten sind und ob ein oder zwei Bausteine eingesetzt wurden.

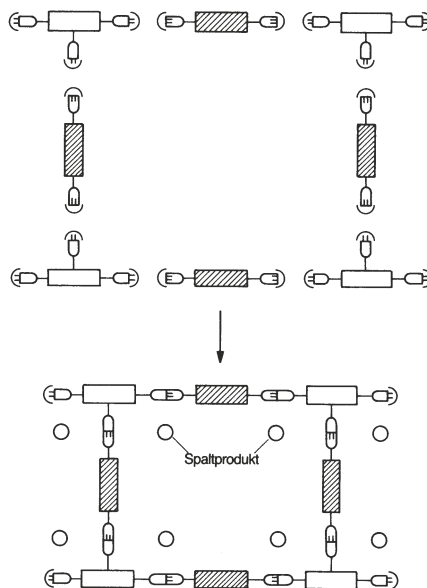
Polyamid	Molekülbausteine
PA 6	
PA 66	
PA 610	
PA 11	
PA 12	

Bei den Polyamidbeispielen sind jeweils Molekülbausteine mit zwei reaktionsfähigen Atomgruppen eingesetzt worden. Die erhaltenen Polykondensationsprodukte sind daher Thermoplaste. Weitere wichtige thermoplastische Polykondensationsprodukte sind u. a. Polycarbonat, Polyethylenterephthalat bzw. -butylenterephthalat.

Duroplastische Polykondensate

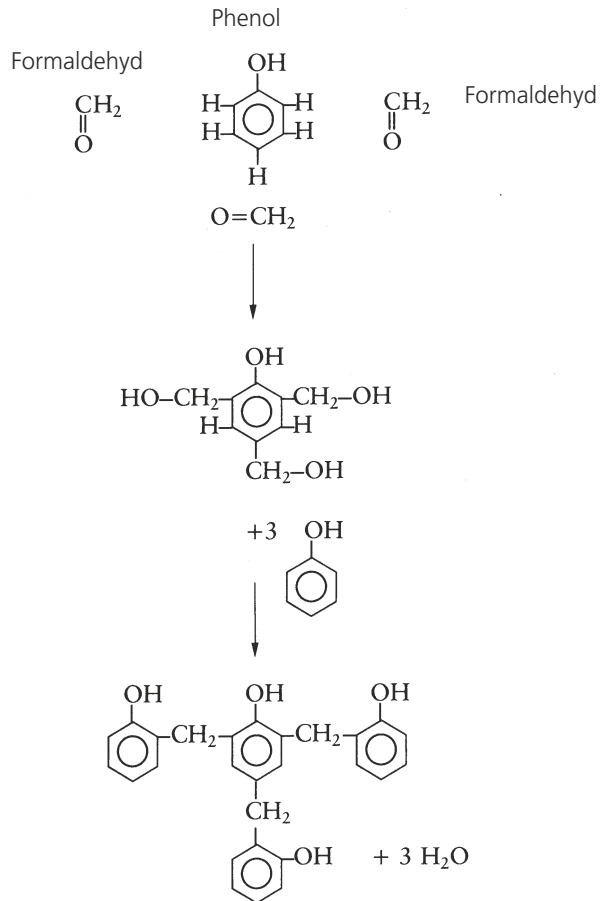
An die Moleküle lassen sich auch mehr als zwei reaktionsfähige Atome oder Atomgruppen anbauen. Beim Einsatz einer Molekülart mit mehr als zwei reaktionsfähigen Gruppen entstehen netzartig verknüpfte Makromoleküle (Duroplaste).

Modellbeispiel



Phenol-Formaldehydharz (PF)

Bei der Reaktion von Phenol und Formaldehyd besteht die Möglichkeit, die Reaktion an drei Stellen beim Phenol stattfinden zu lassen.



Nach vollständiger Reaktion von Phenol mit Formaldehyd bildet sich ein engmaschiges Raumnetz-molekül, wie es in Bild 1.3 als Ausschnitt aus einem vernetzten Molekülverband dargestellt ist.